

СТРОИТЕЛЬСТВО. АРХИТЕКТУРА

УДК 691.32

С. Д. Семенюк, И. И. Мельянцова

ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИЙ УСАДКИ КОНСТРУКЦИОННОГО КЕРАМЗИТОЖЕЛЕЗОБЕТОНА

UDC 691.32

S. D. Semeniuk, I. I. Melyantsova

RESEARCH INTO SHRINKAGE DEFORMATIONS OF STRUCTURAL EXPANDED CLAY CONCRETE

Аннотация

В статье исследованы основные механизмы возникновения объемных деформаций усадки в бетонах, а также факторы, оказывающие влияние на усадочные деформации. Показаны эмпирические зависимости для описания процесса усадки во времени. Предложены варианты подготовки экспериментальных образцов для исследования усадочных деформаций в конструкционном керамзитожелезобетоне.

Ключевые слова:

керамзитобетон, усадка, набухание, объемные деформации.

Abstract

The article examines the main mechanisms of bulk shrinkage deformations in concrete, as well as factors that influence shrinkage deformations. Empirical relationships for describing the shrinkage process over time are shown. Options for preparing experimental samples to study shrinkage deformations in structural expanded clay-reinforced concrete are proposed.

Keywords:

expanded clay concrete, shrinkage, bulking, volume deformations.

Введение

Проведенные многочисленными авторами исследования деформаций усадки тяжелого бетона показали, что от данных деформаций в элементах зданий и сооружений могут возникать значительные сжимающие напряжения. Учет этих дополнительных напряжений, возникающих в конструкциях, позволил бы уточнить методики расчета конструкций, в частности из керамзитожеле-

зобетона. Можно сказать, что явление усадки в легких бетонах на сегодняшний день исследованы недостаточно полно как теоретически, так и экспериментально.

При проектировании бетонных конструкций обычная проблема усадки заключается в том, чтобы не допустить чрезмерного ее увеличения. Избыточная усадка может привести к образованию трещин достаточной величины, чтобы разрушить внешний вид бетона или допу-

стить попадание воды в конструкцию, что может привести к коррозии арматуры.

Усадочные деформации являются важными показателями для железобетона, т. к. они влияют на сцепление бетона с арматурой.

Целью данных исследований является разработка новых представлений о процессах деформирования легких бетонов, а также определить, обеспечивает ли усадка достаточное напряжение сжатия в стали для обоснования снижения требований к растяжению. Результаты, полученные в ходе исследования, необходимы при прогнозировании работы керамзитожелезобетонных конструкций.

Анализ опубликованных работ по исследованию деформаций усадки в Республике Беларусь и за рубежом

А. Е. Шейкиным предложена структурная теория усадки. По его мнению, усадочные деформации цементного камня выражены тем слабее, чем меньше в его структуре гелевидных составляющих и больше кристаллического сростка (влияние химико-минералогического состава). Принято считать, что усадка цементного камня тем больше, чем выше дисперсность цемента. Однако рядом исследований было показано, что в длительные сроки твердения показатели усадки обычно выравниваются.

Значительное влияние на усадку оказывает водоцементный фактор, а именно: с увеличением последнего усадка возрастает и наблюдается более замедленный процесс затухания усадочных деформаций. Температурно-влажностные условия среды существенно влияют на значение конечной усадки цементного камня. Усадка пропаренных образцов в среднем на 30...40 % ниже усадки бетонов естественного твердения. При автоклавной обработке снижение усадки бетона может быть более существенным.

Сдерживающее влияние на усадку цементного камня оказывает заполнитель

в бетоне. Оно проявляется тем сильнее, чем выше его модуль упругости.

С. В. Александровский полагает, что удаление капиллярной и адсорбционной влаги сопровождается значительным сжатием цементного камня, а составляющие этой усадки представляют в сумме так называемую влажностную усадку.

Исходя из морфологии новообразований цементного камня, необходимо отметить, что с увеличением дисперсности частиц новообразований значительно возрастает поверхность раздела твердой и жидкой фаз в цементном камне. Это приводит к увеличению адсорбционно связанной воды поверхностью частиц, к ослаблению сил физического порядка между ними, к снижению прочности цементного камня и увеличению его ползучести.

По-видимому, для легких бетонов на пористых заполнителях, которые отличаются от обычных повышенной деформативностью, рационально создавать такие условия твердения, которые способствуют возникновению более «огрубелой» структуры цементного камня.

Ю. А. Нилендер, изучая изменение объемных деформаций бетона от контракции, назвал их «собственно усадки». Хотя абсолютная величина «собственно усадки» или химической усадки невелика, однако в изделиях с большим расходом цемента она может привести к значительным напряжениям и деформациям цементного камня.

Самопроизвольные влажностные деформации усадки и набухания цементного камня являются одной из основных причин появления в нем «собственных» напряжений. Особенно велики напряжения от усадки, которые становятся иногда выше предела его прочности на растяжение и вызывают образование микро- и макротрещин.

На усадку цементного камня и бетона влияют многие факторы: вид цемента, состав бетона, вид заполнителя,

условия приготовления, массивность элемента, температурно-влажностные условия среды и др.

До настоящего времени пока еще нет общепринятой интерпретации влажностной усадки цементного камня.

С. В. Александровский, А. В. Белов, В. В. Михайлов, Н. А. Мощанский, Ю. А. Нилендер, З. Н. Цилосани, А. Е. Шейкин, Э. Фрейсине, Т. Пауэрс, Г. Карлушек, Р. Лермит, В. Чернин и др. по-разному объясняют физическую природу рассматриваемых деформаций усадки и набухания.

Ряд исследователей считает основной причиной усадки цементного камня капиллярные явления. Эта гипотеза предложена Э. Фрейсине.

Анализируя многочисленные работы, можно проследить достаточно четко проявляющуюся закономерность. Сущность ее заключается в том, что по мере раздвижки зерен крупного заполнителя их прочность оказывает все меньшее влияние на прочность бетона.

Логичность этой закономерности вполне очевидна, поскольку при малых расходах цемента и минимальной толщине обоймы бетон представляет собой каркас из заполнителя, пустоты которого заполнены цементным раствором. При такой структуре прочность запол-

нителя играет важную роль – она должна существенно превышать требуемую марку бетона.

По мере повышения расхода цемента и увеличения количества раствора (очень жирные, малопесочные растворы имеют свои недостатки), каркас заполнителя как таковой перестает существовать, структуру бетона можно характеризовать «плавающим» заполнителем – по терминологии И. М. Френкеля, и доминирующая роль в этом случае переходит к прочности раствора и его сцеплению с заполнителем.

К такой категории относятся конструктивные легкие бетоны и бетоны на малопрочных известняковых заполнителях. Следует полагать, что названные бетоны имеют высокую величину прочности за счет перераспределения функций между заполнителем и раствором. Именно высокопрочный раствор начинает выполнять функции каркаса (обоймы) и за счет повышенных сил сцепления с заполнителем обеспечивает монолитность конгломерата.

Усадка происходит, когда влажность окружающей среды меньше влажности бетона. Одним из негативных последствий усадки является появление трещин (рис. 1).

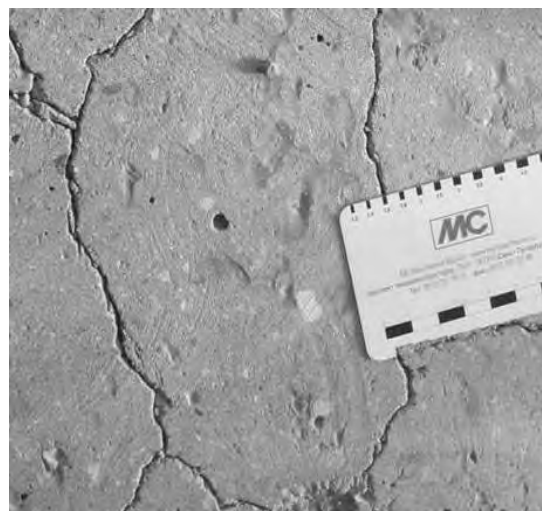
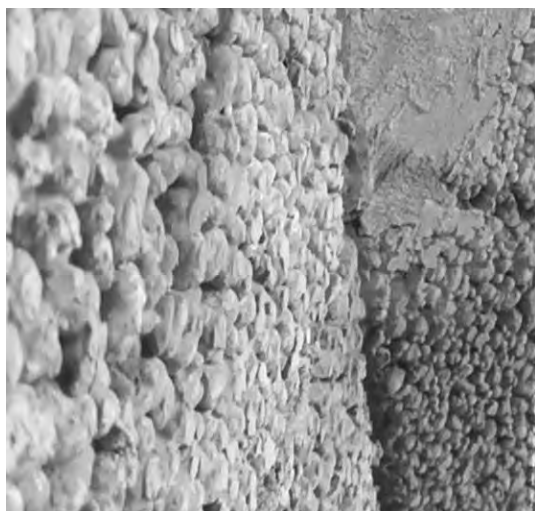


Рис. 1. Усадочные трещины

Способность заполнителя к сопротивлению деформациям может оказать существенное влияние на уменьшение усадки, т. е. чем выше их модуль упругости, тем меньше будут деформации. Различные гидравлические добавки и ускорители твердения (хлористый кальций), как правило, увеличивают усадку.

Обычно усадка наиболее интенсивно происходит в начальный период твердения и в течение первого года, в последующем постепенно затухает. Также скорость усадки напрямую зависит от влажности окружающей среды твердения бетона – чем меньше влажность, тем больше усадочные деформации и выше скорость их роста. Усадка бетона под нагрузкой при длительном сжатии ускоряется, а при длительном растяжении, наоборот, замедляется.

В. И. Мурашев в своих исследованиях говорит о том, что в период твердения бетона усадке цементного камня препятствуют заполнители, которые выполняют роль внутренних связей и вызывают в цементном камне первоначальные растягивающие напряжения. Неравномерное высыхание бетона приводит к неравномерной его усадке, что приводит к возникновению начальных усадочных напряжений. Наружные поверхностные слои бетона высыхают быстрее и испытывают растяжение, в то время как внутренние, более влажные зоны, препятствующие усадке поверхностных слоев, оказываются сжатыми. Следствием таких растягивающих начальных напряжений являются усадочные трещины в теле бетона.

Начальные напряжения, возникающие при твердении бетона, не учитываются непосредственно в расчете прочности железобетонных конструкций, наличие их усиливается коэффициентом однородности бетона, охватывающего всю совокупность вопросов прочности, а также конструктивными мероприятиями в армировании железобетонных элементов.

Составляющие полной усадки для конструкций из керамзитожелезобетона

По сравнению с тяжелыми бетонами протекание усадки в легких бетонах имеет ряд особенностей. Изменение объема в легких бетонах проявляется более интенсивно под влиянием факторов увлажнения или высыхания. Поэтому полная усадка легких бетонов, чаще всего несколько больше (на 15...25 %) усадки равнопрочных тяжелых бетонов. В первые периоды твердения легких бетонов (3...40 ч) наблюдается увеличение объемов, вызванное тепловым расширением заземленного воздуха под влиянием экзотермической теплоты (с выделением). Вследствие этого в начальный период бетон набухает, а затем уменьшается в объеме, т. е. начинают проявляться усадочные деформации.

Контроль величины усадки может быть осуществлен путем правильного выбора материалов, дозирования и твердения. Теоретически можно устранить все усадки, но требования для этого не будут практичными. Усадка является важным показателем в случае железобетона, т. к. она влияет на сцепление бетона с арматурой, уменьшая тем самым возможность проскальзывания стержня.

Размер трещин, образующихся при усадке бетона, может быть уменьшен за счет применения арматуры. Количество используемого армирования может быть недостаточно для значительного уменьшения общей величины усадки, но приводит к образованию множества мелких трещин, а не нескольких крупных.

Стандартные железобетонные конструкции не учитывают предварительное сжатие арматуры и предполагают, что стержни начинают работать с нулевой нагрузки. Если существует предварительное сжатие определяемого и согласованного количества арматуры в бетоне, то данный способ проектиро-

вания требует избыточного количества растяжимой стали.

На основе статистического анализа опытных данных найдены формулы, позволяющие вычислить относительные деформации усадки ε_{sh} в зависимости от наиболее влияющих факторов – расхода воды и цемента.

Так, для керамзитобетона на кварцевом песке при естественном твердении при продолжительности процесса 100 сут используют формулу

$$\varepsilon_{sh}(100) = 6,7 \cdot 10^{-6} (B\sqrt{C})^{\frac{1}{2}}, \quad (1)$$

где B и C – расход воды, л, и цемента, кг, на 1 м^3 бетона.

Для описания процесса усадки во времени можно использовать формулу

$$\varepsilon_{sh}(t) = 4 \frac{t \varepsilon_{sh}(100)}{100 + 3t}, \quad (2)$$

где t – продолжительность процесса, сут.

Необходимо отметить, что в конструкционных легких бетонах модуль

упругости заполнителя обычно меньше модуля упругости цементного камня, поэтому напряжение в растворной части от усадки меньше напряжений в равнопрочном тяжелом бетоне. Одновременно усадка растворной части способна вызывать существенные напряжения в заполнителе.

В армированном элементе свободные усадка и ползучесть сдерживаются арматурой, которая играет роль внутренней связи, т. к. ее модуль упругости выше модуля упругости бетона. Вследствие этого деформации усадки и ползучести армированного бетона ниже, чем неармированного, причем, чем выше коэффициент армирования μ , тем больше его влияние.

Под влиянием разности деформаций свободной усадки бетонного элемента ε_{sl} и стесненной усадки армированного элемента $\varepsilon_{sl,s}$ (рис. 2) образуется средняя деформация бетона, порождающая в бетоне средние растягивающие напряжения.

$$\varepsilon_{bt} = \varepsilon_{sl} - \varepsilon_{sl,s}. \quad (3)$$

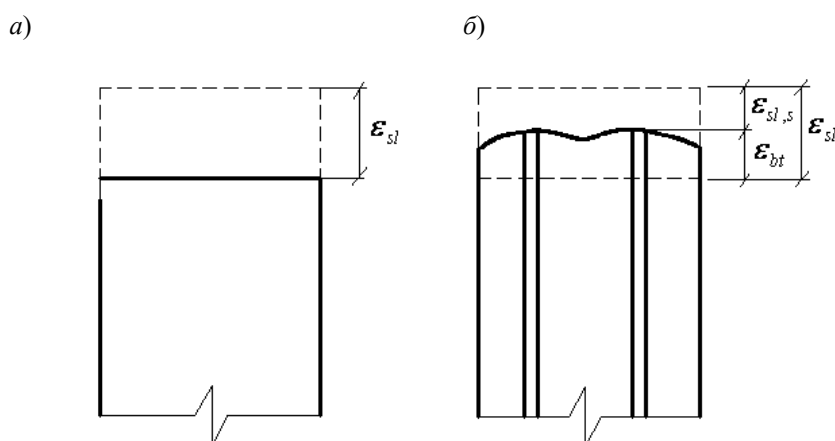


Рис. 2. Деформации усадки образцов: а – бетонного; б – железобетонного

Наибольшие значения этих напряжений находятся в зоне контакта с арматурой. Деформации $\varepsilon_{sl,s}$ являются для арматуры упругими, и в ней возникают

сжимающие напряжения.

Теоретически влияние армирования на процессе усадки получим, используя условие внутреннего равно-

весия в любой момент времени t

$$\sigma_{bt}(t) \cdot A_b = \sigma_s(t) \cdot A_s \quad (4)$$

и условие совместности деформаций

$$\varepsilon_{sl,s}(t) = \varepsilon_{sl}(t) - \varepsilon_{bt}(t), \quad (5)$$

где $\sigma_{bt}(t)$ – растягивающие напряжения в бетоне к моменту времени t ; $\sigma_s(t)$ – сжимающие напряжения в арматуре к моменту времени t ; A_b – площадь поперечного сечения бетона; $\varepsilon_{sl}(t)$ – деформации свободной усадки бетона к моменту времени t ; $\varepsilon_{sl,s}(t)$ – деформации сжатия в арматуре к моменту времени t ; $\varepsilon_{bt}(t)$ – деформации растяжения в бетоне к моменту времени t .

При расчетах применяют также эмпирические зависимости, основанные на экспериментальных данных. Так, для керамзитобетона используют формулу

$$\bar{\varepsilon}_{sl}(t) = 4t\varepsilon_{sl}(100) \frac{e^{-20\mu}}{100 + 3t}, \quad (6)$$

где $\varepsilon_{sl}(100)$ – свободная усадка бетона к моменту наблюдений (100 сут).

Исследования НИИСК Госстроя СССР, в частности А. Б. Гольшева, о протекании усадки представлены ниже.

От особенностей бетона проявлять деформации усадки в значительной мере зависит его плотность в различных средах, а также прочность и сопротивление трещинообразованию.

Существенное значение имеет также капиллярное давление в порах цементного камня. При контакте жидкости, находящейся в порах, со стенками капилляров силы притяжения, которые действуют между молекул цементного скелета и жидкостью, заставляют ее подниматься по стенке капилляра, что приводит к искривлению поверхности жидкости – возникновению менисков. Это создает капиллярное давление,

которое оказывает сжимающее действие на стенки, ограничивающие жидкость.

Капиллярное давление в порах имеет довольно значительную величину и возрастает с уменьшением ее размеров. Поскольку микропоры в цементном камне расположены в разных направлениях, это давление взаимно уравновешивается, действует как всестороннее сжатие, под влиянием которого также происходят объемные деформации.

Эти факторы усадки зависят от интенсивности испарения, которое определяется величиной влажностного перепада между бетоном и окружающей средой. Полная усадка цементного камня, высушенного до абсолютно сухого состояния, определяется только усадкой геля, поскольку усадка, вызываемая действием капиллярных сил, может полностью восстанавливать первоначальное положение.

В начальный период твердения усадке препятствуют заполнители, которые становятся внутренними связями и вызывают в цементном камне начальные напряжения растяжения. Влияние заполнителей на уменьшение усадки тем сильнее, чем больше их способность сопротивляться деформированию, т. е. чем больше их модуль упругости. По мере твердения геля кристаллические сростки, образующиеся в нем, становятся такого же рода связями.

Необходимо отметить, что эти взаимодействия происходят в грубо неоднородной среде при разной величине зерен заполнителя, разных упругих свойствах цементного камня и заполнителей при наличии в цементном камне пор, а в бетоне – полостей, вызванных дефектами уплотнения. Поэтому величина и направление начальных напряжений усадки имеют случайный характер и подчиняются только статистическим закономерностям. В любом случае начальные напряжения могут быть причиной микроразрушений в бетоне, при этом микротрещины образуются преимущественно на поверхностях сцепле-

ния заполнителей с цементным камнем. Ко всему вышесказанному следует добавить неравномерное высыхание бетона по объему, которое приводит к возникновению начальных усадочных напряжений. Открытые поверхностные слои бетона, которые быстро высыхают, подвержены растяжению, тогда как внутренние, более влажные зоны, препятствующие усадке поверхностных слоев, подвержены сжатию. Последствием таких напряжений растяжения в еще непрочном бетоне являются поверхностные трещины.

Усадка бетона зависит от ряда факторов, основные из них: количество и вид цемента, количество воды, крупность и вид заполнителя.

Усадка наиболее интенсивно проявляется в начальный период твердения бетона и в течение первого года. По мере высыхания бетона уменьшается влажностный градиент, растущие кристаллические сростки создают в дальнейшем большее сопротивление внутреннему давлению, деформации усадки постепенно исчезают.

Для аналитического выражения усадки бетона удобно пользоваться эмпирической формулой

$$\varepsilon_{sh}(t) = \varepsilon_{sh,lim} (1 - e^{-\lambda_{sh} \cdot t}), \quad (7)$$

где $\varepsilon_{sh,lim}$ – граничные деформации усадки (при $t = \infty$); λ_{sh} – опытный параметр, характеризующий скорость усадки, сут⁻¹; t – время, сут.

Определяют граничные значения относительных деформаций усадки по зависимости

$$\varepsilon_{sh,lim} = \varepsilon_{shm} \xi_1 \xi_2 \xi_3, \quad (8)$$

где ε_{shm} – среднестатистическое значение $\varepsilon_{sh,lim}$ для условий, принятых за среднее для сечения образца 10×10 см (относительная влажность воздуха –

70 %, возраст, с которого начинается учет усадки, – 7 сут); ξ_1, ξ_2, ξ_3 – коэффициенты, учитывающие влияние отклонения реальных условий работы бетона от принятых средних: возраст бетона на начало высыхания, размеры образца, относительная влажность среды.

При наличии данных о дозировке составляющих

$$\varepsilon_{shm} = 0,14 \cdot 10^{-6} (w + a)^{\frac{3}{2}}, \quad (9)$$

где w и a – количество воды в замесе по объему и вместимость привлеченного воздуха в бетонной смеси, л/м³.

Нарастание усадки, как и нарастание прочности бетона, происходит примерно пропорционально логарифму времени. При этом усадка распространяется от поверхности вглубь бетона, а не протекает равномерно по объему; у поверхности она наибольшая.

Наиболее удовлетворительное объяснение усадки дают две теории, сущность которых заключается в следующем.

По первой теории (структурной) явление усадки ставится в зависимость от физико-химических процессов, сопровождающихся схватыванием цементного теста и твердением цементного камня. При этом одной из главных причин служит то, что цементное тесто, представляющее собой вначале студнеобразную массу (гель), в результате испарения избыточной воды, а отчасти и поглощения воды зернами цемента, вступающими в реакцию, постепенно обезвоживается и уплотняется. К этому присоединяется еще и влияние процесса кристаллообразования; кристаллы пронизывают массу геля и, срастаясь между собой, создают твердый скелет (сросток) цементного камня. Совместное влияние этих процессов и вызывает в цементном камне объемные изменения, называемые усадкой.

По второй теории (Фрейсине) исходят из свойств капиллярности, считая,

что поверхностное натяжение менисков, образующихся в смоченных водой порах, приводит к стягиванию стенок пор, что в результате и вызывает сжатие цементного камня. Так как микропоры распределены по всей массе бетона более или менее равномерно в различных направлениях, то создаваемые капиллярными натяжениями давления взаимно уравниваются и производят как бы всестороннее сжатие бетона. В результате бетон получает объемную деформацию – усадку.

Следует отметить, что обе теории не исключают друг друга.

Варианты подготовки керамзитожелезобетонных образцов к испытаниям для исследования деформаций усадки

Для исследований деформаций усадки предлагаются два варианта керамзитожелезобетонных образцов (рис. 3):

- 1) образец с переходными штуцерами;
- 2) образец с пластинами-«рыбками».

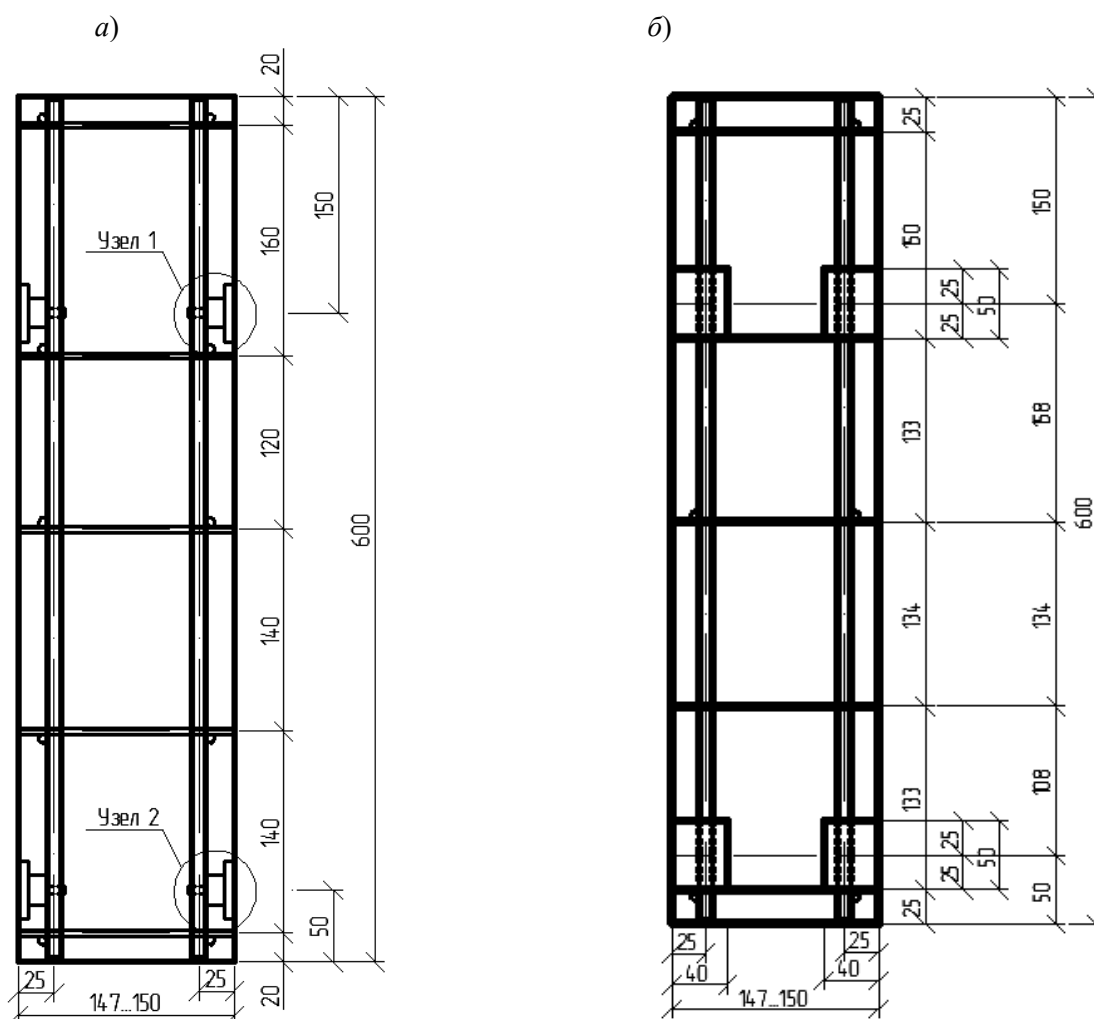


Рис. 3. Опытные образцы: а – с установленными переходными штуцерами; б – с «рыбками»

Для экспериментальных исследований усадочных деформаций армированного керамзитобетона используются

призмы размерами 150 × 150 × 600 мм и индикаторы часового типа с ценой деления 0,001 мм на базе 400 мм. В рабо-

чей арматуре выполняют отверстие диаметром 5 мм, в которое на клей вставляется штуцер. Для дополнительной надежности с внутренней стороны рабочая арматура и штуцер свариваются между собой.

Образец с «рыбками» выполняется размерами 150 × 150 × 600 мм. Сначала, как и в первом случае, выполняется каркас из продольной и поперечной арматуры. Затем устанавливаются пластины-«рыбки» и привариваются к готовому каркасу. Полученный каркас заливается в форме.

Заключение

Деформации усадки являются важнейшей характеристикой любого вида бетона, учет ее особенно необходим при массовом производстве изделий и конструкций из него. Известно,

что у тяжелых бетонов усадка протекает лишь в цементной составляющей бетонной смеси. При этом крупный и мелкий заполнитель усадочных деформаций не претерпевает, лишь только препятствует проявлению усадочных явлений в цементном камне. В бетонах же на пористых заполнителях, в частности в керамзитобетонах, усадка может протекать не только в цементном камне, но и в гранулах заполнителя. Поэтому в таких бетонах процесс развития усадочных деформаций оказывается более сложным, чем в тяжелых бетонах.

Исследования объемных деформаций усадки позволят провести анализ основных характеристик длительных свойств конструкционного керамзитожелезобетона, необходимых для учета в преднапряженных конструкциях зданий и сооружений.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шейкин, А. Е. К вопросу прочности, упругости и пластичности бетона / А. Е. Шейкин // Тр. МИИТ. – 1964. – Вып. 69. – С. 21–29.
2. Александровский, С. В. Расчет бетонных и железобетонных конструкций на температурные и влажностные воздействия (с учетом ползучести) / С. В. Александровский. – Москва: Стройиздат, 1966. – 354 с.
3. ТКП EN 1992-1-1–2009 (02250). Еврокод 2. Проектирование железобетонных конструкций. Ч. 1-1: Общие правила и правила для зданий. – Минск: Стройтехнорм, 2009. – 312 с.
4. Ахвердов, И. Н. О научных проблемах в области легких бетонов / И. Н. Ахвердов // Аглопорит и аглопоритобетон. – Минск, 1964. – С. 12–20.
5. Симонов, М. З. Основы технологии легких бетонов / М. З. Симонов. – Москва: Стройиздат, 1973. – 584 с.
6. Бужевич, Г. А. Исследование по крупнопористому бетону на пористых заполнителях / Г. А. Бужевич. – Москва: Госстройиздат, 1962. – 142 с.
7. Чеховский, Ю. В. Изменение пористой структуры и форм связи в цементном камне в процессе его твердения / Ю. В. Чеховский, В. А. Лейрих, В. М. Казанский // Коллоидный журнал. – 1965. – Т. 27, № 1. – С. 186–192.
8. Ахвердов, И. Н. Влияние фазовых превращений в процессе твердения цементного камня на его физико-механические и деформативные свойства / И. Н. Ахвердов // Структура, прочность и деформации бетонов. – Москва, 1966. – С. 122–138.
9. Пауэрс, Т. Физические свойства цементного теста и камня / Т. Пауэрс // IV Междунар. конгресс по химии цемента. – Москва: Стройиздат, 1964. – С. 119–131.
10. Френкель, И. М. Технологические основы и расчет состава бетона / И. М. Френкель. – Москва: Госстройиздат, 1961. – 127 с.
11. Семенюк, С. Д. Стесненная деформация усадки армированного керамзитобетона и ее определение / С. Д. Семенюк, И. И. Мельянцова, А. Б. Тимофеева // Проблемы современного строительства: материалы Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 28 мая 2019 г. – Минск: БНТУ, 2019. – С. 121–130.
12. Семенюк, С. Д. Исследование деформаций набухания керамзитобетона / С. Д. Семенюк, В. А. Ржевущая // Проблемы современного строительства: материалы Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 28 мая 2019 г. – Минск: БНТУ, 2019. – С. 130–137.

13. **Bazant, Z. P.** Drying creep of concrete: constitutive model and new experiments separating its mechanisms / Z. P. Bazant, Y. Xi. – 1994. – № 27 (1). – P. 3–14.
14. **Clarke, J. L.** Structural Lightweight Aggregate Concrete / J. L. Clarke // Glasgow, UK: Blackie Academic & Professional, an imprint of Chapman & Hall, 2005. – 161 p.
15. **Мурашев, В. И.** Железобетонные конструкции. Общий курс / В. И. Мурашев, Э. Е. Сигалов, В. Н. Байков. – Москва: Гос. изд-во лит. по стр-ву, архитектуре и строит. материалам, 1962. – 659 с.
16. **Бабич, Е. М.** Конструкции из легких бетонов на пористых заполнителях / Е. М. Бабич. – Киев: Вища школа, 1988. – 207 с.

Статья сдана в редакцию 7 октября 2020 года

Славик Денисович Семенюк, д-р техн. наук, проф., Белорусско-Российский университет. Тел.: +375-297-43-38-72.

Ирина Игоревна Мельянцева, ассистент, Белорусско-Российский университет. Тел.: +375-297-48-07-07.

Slavik Denisovich Semeniuk, DSc (Engineering), Prof., Belarusian-Russian University. Tel.: +375-297-43-38-72.

Iryna Igorevna Melyantsova, assistant lecturer, Belarusian-Russian University. Tel.: +375-297-48-07-07.